

山西省生态安全格局空间识别研究

杜世勋, 荣月静

(山西省生态环境研究中心, 太原 030009)

摘要: 维护生态安全格局对于生态环境的维护和改善、支撑经济社会可持续发展具有重要作用。生态保护红线是识别区域生态安全格局的基础框架和关键组分, 划定生态保护红线有助于保障生态安全。为研究山西省生态安全格局空间识别, 结合山西省生态环境现状, 应用水源涵养、水土流失、维护生物多样性、防风固沙生态系统服务功能与水土流失、土地沙化生态敏感性评价划定生态保护红线的方法, 利用最小累积阻力算法的思想, 通过确定生态保护红线为“生态源地”, 进而得出缓冲区、生态廊道、辐射通道和战略节点识别生态安全格局。结果表明: 研究区生态安全格局分为三级, 依次分为高安全水平格局、中等安全水平格局和最低标准安全水平格局, 各分区面积比例分别为 24.45%, 25.66% 和 30.24%, 有效突出了山西省生态安全格局分布, 为保障我省生态系统的完整性、生态系统服务功能的重要性具有重要的意义。

关键词: 生态保护红线; 最小累积阻力模型; 生态安全格局; 生态廊道

中图分类号: Q148

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0147-07

Study on Spatial Identification of Ecological Security Pattern in Shanxi Province

DU Shixun, RONG Yuejing

(Research Center for Eco-Environment Science in Shanxi, Taiyuan 030009, China)

Abstract: Maintenance of ecological security pattern is important for the maintenance and improvement of the ecological environment, and has an important role to support sustainable economic and social development. Ecological protection red line is the basic framework and the key component of ecological security pattern, the delineation of the red line has contributed to protect the ecological security. In order to study the spatial pattern of ecological security pattern in Shanxi Province, combining with the current situation of ecological environment in Shanxi province, we used the evaluation ecosystem service function of water conservation, soil erosion, biodiversity maintenance, windbreak and sand fixation, and the ecological sensitivity of soil and water loss, land desertification to delineate ecological protection red line, used the minimum cumulative resistance algorithm to determine the source-ecological protection red line and buffer zone, ecological corridor, radiation channel and strategic nodes to identify ecological security pattern. Above all, classification of ecological security in the study area, the ecological security will be divided into the pattern of high level security, low level security and the lowest standard level security, the proportions of the areas were 24.45%, 25.66% and 30.24%, respectively. It is important to highlight the distribution of ecological security pattern in Shanxi Province, which is of great significance to ensure the integrity of the ecosystem and the importance of ecosystem services.

Keywords: ecological protection red line; minimal cumulative resistance; ecological security pattern; ecological corridor

近年来,随着城市化进程的不断发展,土地利用与覆盖不断发生翻天覆地的变化,识别生态安全格局刻不容缓^[1-3]。在城市扩张过程中,从生态安全的角度对城市空间格局进行优化,从而使有限的生态用地

的生态效益最大化十分重要^[4-6],是实现人类福祉、经济可持续发展、维护生态环境的重要保障。相关学者针对生态安全格局空间识别的方法不断的摸索,俞孔坚等依据“基质—斑块—廊道”的理论,将生态安全格

域涵盖生态源地、缓冲区、生态廊道、辐射通道、生态战略节点五部分。多数学者对“生态源地”的识别仅仅局限在自然保护区、湿地公园、风景名胜区的核心区或一定面积的林地、水体等^[7-8],不能体现源地识别的完整性;从研究方法上主要包括定性规划、3S技术、情景分析法、指标评价法与动态模拟等^[9],这将生态安全的格局范围仅仅局限在空间水平范围内,傅伯杰等^[10]指出生态安全格局不仅存在于水平空间,同样存在于垂直空间上。

依据2015年环境保护部发布的《生态红线划定技术指南》(环发[2015]56号)中对生态保护红线进行定义,生态保护红线是依法在重点生态功能区、生态敏感区和脆弱区划定的严格管控边界,是国家和区域生态安全的底线^[11-13]。生态保护红线与国际上保护地系统有类似之处^[14-16],生态保护红线具有明确的边界,保障重要的生态功能区、敏感区与脆弱区,作为生态安全格局的生态源地,补充了前人源地单一的缺点,为生态安全格局的空间识别提供了新思路。

本研究结合前人研究^[17-18],运用多因素综合评价法,充分考虑水平垂直指标因子,将生态保护红线作为源地,应用最小累积阻力模型,利用ArcGIS的空间分析功能,识别出包括生态源地、缓冲区、生态廊道、辐射通道与生态战略节点的生态安全格局,并对格局进行分级分析,据此优化山西生态安全格局战略与相关生态与土地规划。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

山西雄踞于黄河中游左岸的黄土高原之上,境内山峦起伏,沟壑纵横,丘陵、盆地布满其间,山地、高原相互连接,东部、东南部是恒山、五台山、太行山、太岳山和中条山为主体的山地高原区;西部是吕梁山、云中山、芦芽山等山脉及相连的黄土高原区。土地利用类型主要以旱地为主,近十年草丛逐渐向落叶阔叶灌木林和落叶灌木林转换,植被恢复较好;山西省从2014年开始生态保护红线划定研究,在全省水源涵养、生物多样性维护和水土保持、防风固沙等重要生态功能区内和水土流失、土地沙化敏感区内划定生态保护红线。山西省具有以黄土高原丘陵沟壑水土流失防治区和京津风沙源治理区为主体的生态治理带,以吕梁山为主体的黄河干流和汾河源区生态屏障带,以太行山为主体的海河主要支流源区生态屏障带和以太岳山、中条山为主体的沁河、涑水河与黄河干流源区屏障带的“一带三屏”为主体的生态安全格局分布。结合生态保护红线划定与生态安全格局空间识

别的研究对山西省生态安全保障具有重大的意义。

1.2 数据来源

本文所采用的数据包括山西省土地利用数据、NDVI数据、NPP数据、土壤属性数据、DEM数据、气象数据(气温、降水),道路图、水系图等。其中土地利用类型数据来源自全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查与评估项目数据,划分土地利用类型为林地、草地、湿地、耕地、建设用地及其他用地;NDVI数据使用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)提供的数据,分辨率为250 m;NPP数据使用CASA光能利用率模型计算得到;土壤数据来源于第二次全国土壤调查南京土壤所提供的1:100万土壤数据,分辨率为1 km;DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站的SRTM地形数据,分辨率为30 m数据;气象数据来自中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料年值数据集,收集山西省2000—2010年108个基本、基准地面气象观测站及自动站的气温、降水量等气象数据。

2 研究方法

2.1 划定红线方法

依据土地利用现状、NPP、气象因素、土壤属性等因子,对研究区生态系统服务功能以及生态敏感性进行评价,生态服务功能包括水源涵养、水土保持、生物多样性保护,防风固沙;生态敏感性包括土地沙化与水土流失敏感性(评价方法见表1)。按照自然断裂法分别对生态服务功能与生态敏感性评价结果进行分级,生态服务功能划分为极重要、重要、中等重要、一般重要四部分,生态敏感性划分为极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感五部分,然后选取生态服务功能极重要和重要部分,生态敏感性极敏感和敏感部分形成生态保护红线栅格图,利用GIS软件,对生态保护红线栅格图,依据国土二调数据和全国第一次国情普查山西地区土地利用数据进行调整边界,最后形成山西省生态保护红线边界图。

水源涵养重要性评价中, P_i 为研究区2000—2010年十年所有降水量(包括液态降水和固态降水),没有经过蒸发、渗透和流失而在水平面上积聚的深度,单位为mm,由通过克里格插值法得到。 K_i 为各土地利用类型的成熟度和保护状态,原始森林为1,优良草地为1,耕地、水域和其他地类为1,其他林地和退化草地为0.9,0.95。径流因子 α 指一定汇水面积的地面径流量与降雨量的比值,根据前人经验,原始森林为0.73,其他林地为0.6,水域为0.99,草地和耕地为0.5,其他地类为0.01。

表 1 山西省生态服务功能与生态敏感性评价方法^[19,20]

评价类型	计算公式	参数
水源涵养重要性	$W_i = \sum 10 \times A_i \times C_i \times K_i \times P_i \times \alpha$	W_i 表示水源涵养量, m^3 ; P_i 表示多年平均降水量; A_i 表示土地利用类型的面积, hm^2 ; C_i 表示植被覆盖指数; K_i 表示发育度指数; α 表示径流系数
土壤保持重要性	$A_i = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$	A_i 表示土壤保持量; R 表示降水因子; K 表示土壤侵蚀因子; L, S 表示地形因子; C 表示植被覆盖因子
生物多样性重要性	$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt})$	S_{bio} 表示生物多样性保护服务能力指数; NPP_{mean} 表示多年平均年植被净初级生产力; F_{pre} 表示降水量因子; F_{tem} 表示气温因子; F_{alt} 表示海拔因子
防风固沙重要性	$S_{ws} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times F_q \times D$	S_{ws} 表示防风固沙服务能力指数; NPP_{mean} 表示多年平均年植被净初级生产力; K 表示土壤可蚀性; F_q 表示气象侵蚀力; D 表示地表粗糙度
水土流失敏感性	$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i}$	SS_i 为 i 空间单位水土流失敏感性指数; R_i 表示降雨侵蚀力; K_i 表示土壤可蚀性; LS 表示坡度坡长; C_i 表示地表植被覆盖度
土地沙化敏感性	$D_i = \sqrt[4]{I_i \times W_i \times K_i \times C_i}$	D_i 为 i 评价区域土地沙化敏感性指数; I_i 表示干燥度指数; W_i 表示起沙风天数; K_i 表示土壤质地; C_i 表示植被覆盖度

水土保持重要性评价中, R 为降水因子, 其制备原理为:

$$R = \alpha \left[\left(\sum_{i=1}^{12} P_i^2 \right) / P \right]^\beta$$

式中: P_i 为月均降水量; P 为年均降水量; $\alpha = 0.3589$; $\beta = 1.9462$; K 为土壤质地因子:

$$K = f_{csand} \times f_{d-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

$$f_{csand} = 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256ms(1 - msilt/100)]$$

$$f_{d-si} = [msilt/(mc + msilt)]^{0.3}$$

$$f_{orgc} = 1 - 0.25orgC / [orgC + \exp(3.72 - 2.95orgC)]$$

$$f_{hisand} = 1 - 0.7(1 - ms/100) / \{1 - ms/100 + \exp[-5.51 + 22.9(1 - ms/100)]\}$$

式中: ms 为土壤粗砂含量; $msilt$ 为土壤粉砂含量; mc 为土壤黏粒含量; $orgC$ 为有机碳含量。

C 为地表植被覆盖度。在水域、冰雪和植被覆盖高的地区, 不会发生土壤的沙化; 相反, 地表裸露、植被稀少都会使土壤沙化得机会增加。植被覆盖因子的计算公式如下:

$$C_i = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中: $NDVI_{veg}$ 表示完全植被覆盖地表所贡献的信息; $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖地表所贡献的信息。

生物多样性重要性评价中, 生态系统净初级生产力(NPP)是基于 CASA 光能利用率模型进行计算, 是由植物的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ϵ)两个因子来表示。 F_{pre} 降雨因子制备原理同水源涵养重要性评价中的 P_i ; F_{tem} 气温因子为 2000—2010 年近十年平均气温的均值; F_{alt} 坡度因子是应用 GIS 软件由高程提取而成。

防风固沙重要性评价中, NPP 制备原理同生物多样性重要性评价的 NPP; K 制备原理同水土保持重要性评价中的 K , F_q 为多年平均气候侵蚀力, 制备原理为:

$$F_q = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left\{ \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right\} \times d$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2 \times (1 - r_i)$$

式中: u 为 2 m 高处的月平均风速; ETP_i 为月潜在蒸发量(mm); P_i 为月降水量(mm); d 为当月天数。 T_i 为月平均气温; r_i 为月平均相对湿度(%)。

D 为地表粗糙度, θ 为坡度(弧度), 制备原理为:

$$D = 1 / \cos(\theta)$$

水土流失敏感性评价中, R_i 为降水侵蚀力, 是依据王万忠等利用降水资料计算的中国 100 多个城市的 R 值, 采用克里金内插法, 采用 GIS 技术, 绘制 R 分布图。 L, S 为坡度坡长因子, 制备原理为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad \theta < 5^\circ$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5 \quad 5^\circ \leq \theta < 10^\circ$$

$$S = 21.9 \sin \theta - 0.96 \quad \theta \geq 10^\circ$$

式中: λ 为坡长(m); m 为坡长指数; θ 为坡度。

K_i, C_i 制备原理同水土保持重要性评价中 K 和 C 值。

土地沙化敏感性评价中, I_i 干燥度指数表征研究区干湿程度; W_i 为起沙风天数, K_i 与 C_i 的制备同水土保持重要性评价中 K 和 C 值。

$$I_i = 0.16 \frac{\text{全年} \geq 10^\circ\text{C 的积温}}{\geq 10^\circ\text{C 的期间的降水量}}$$

2.2 最小累积阻力模型

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态源地}} - MCR_{\text{城镇用地}}$$

MCR 模型最早用于生物保护安全格局研究, 是由俞孔坚^[21-22]参考 Knaapen 等的模型和 ArcGIS 常用的费用距离原理修改确定, 反映空间表面中任意一点运动到所有源地间的难易程度。式中, MCR 生态源地表示生态源地扩张的最小累积阻力值, MCR 城镇用地表示城镇用地扩张的最小阻力值。当 MCR 差值为负值时, 表示适合生态源地扩张, 值越小越适宜生态源地扩张; 反之, MCR 差值为正值时, 值越大越适合城镇扩张用地。当 MCR 差值为零时, 则是该区域生态源地扩张与城镇用地扩张的分界线。

3 结果与分析

3.1 山西省生态红线划定

3.1.1 生态服务功能与生态敏感性评价 研究区生态系统的水源涵养量计算采用水量平衡法,通过降水量、蒸发散量及土壤涵养能力等关系来推算,蒸发散量用等价的径流系数来表达;土壤保持量是潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,作为生态系统水土保持功能的评价指标;生物多样性与防风固沙重要性评价均采用 NPP 定量指标评估法进行评价;水土流失和土地沙化敏感性评价分别将各单因子敏感性分布图进行乘积运算得到其敏感性评价结果;评价结果见图1—3。

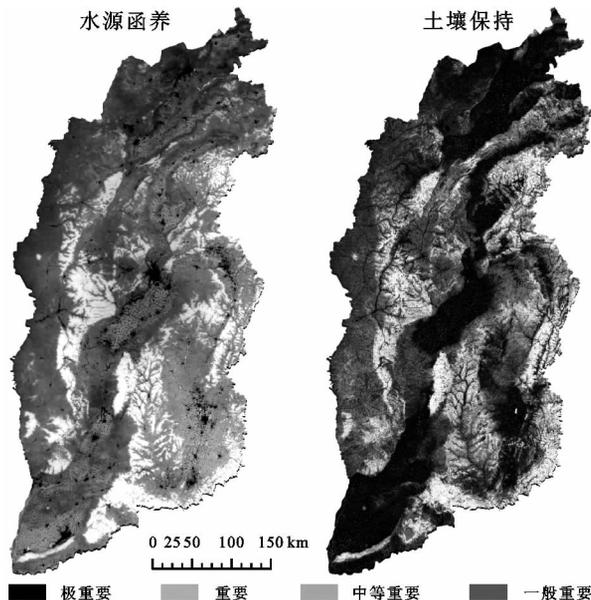


图1 山西省水源涵养、土壤保持重要性评价

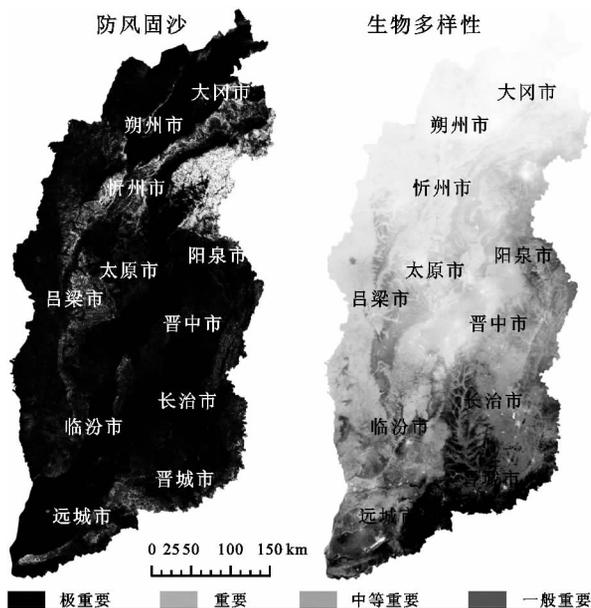


图2 山西省防风固沙、生物多样性重要性评价

3.1.2 生态红线划定结果 将生态系统服务功能评价图中“极重要”部分和生态敏感性评价图中“极敏

感”区域提取出来,并进行保护地空缺分析,加入山西省国家级和省级自然保护区核心、缓冲区、集中式饮用水水源保护区、泉域重点保护区、国家级湿地公园、省级以上地质公园和古生物化石集中产地等,划定山西省生态保护红线方案(附图9)。

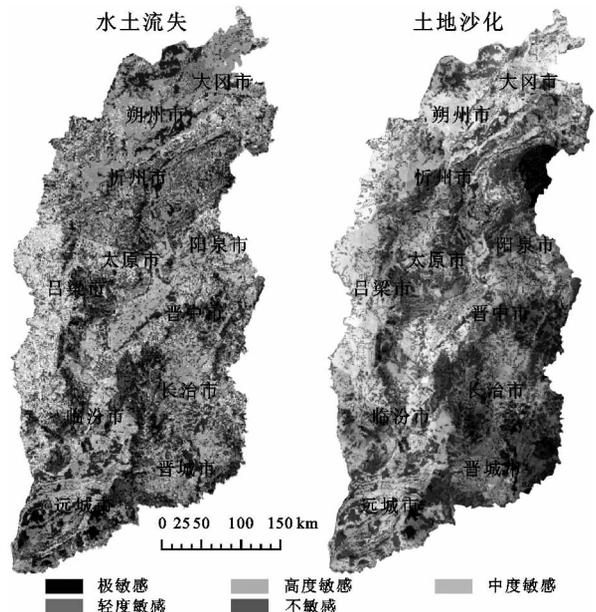


图3 山西省水土流失、土地沙化敏感性评价

山西省生态保护红线区域总面积为 4.20 万 km^2 , 占全省国土面积的 26.79%, 其中 88.3% 的红线区位于山西省主体功能区规划的禁止开发区和限制开发区内, 是落实主体功能区规划的重要措施。其中太行山生态保护红线区面积 2.09 万 km^2 , 占全省国土面积的 13.33%; 吕梁山生态保护红线区面积 1.64 万 km^2 , 占全省国土面积的 10.47%; 恒山以北生态保护红线区面积 0.47 万 km^2 , 占全省国土面积的 2.99%。我省生态保护红线区包括生态系统服务功能极重要区和已有各类生态保护区。其中已有各类生态保护区包括省级以上自然保护区、县级以上城镇集中式饮用水水源保护区的一级保护区、泉域重点保护区、国家级湿地公园、省级以上地质公园和古生物化石集中产地, 总面积 1.37 万 km^2 , 占全省国土面积的 8.74%; 生态系统服务功能极重要区为太行山、吕梁山、恒山、五台山、太岳山、中条山等森林植被覆盖较好的山区和主要河流源头区, 涉及省级以上森林公园和公益林的主要区域, 总面积 2.76 万 km^2 , 占全省国土面积的 17.62%。

3.2 山西省生态安全格局空间识别

生态安全格局包括源地、缓冲区、生态廊道、辐射通道和关键生态战略节点五部分^[18]。参照美国保护管理协会的定义, 将生态廊道理解为“供野生动物使用的狭长带状植被, 通常能促进两地间生物因素的运

用”。生物廊道对于景观连接性具有关键性作用,廊道的连接性、宽度和构成应符合生物保护的要求。

3.2.1 生态源地与建设用地选取 生态安全格局涉及因素众多,源地的识别更是直接影响到生态安全格局空间识别结果。针对山西省主要动物(两栖、爬行与哺乳类)栖息地分布,源地主要是受人类干扰较少或不受干扰的较大成片自然景观斑块。本文选取山西省生态保护红线区作为源地,充分考虑到自然保护区、风景名胜、湿地公园等现有边界与未划入相关生态保护区的大片林地、水体等,也包括存在生态敏感性的区域。城镇建设用地,本文提取生态环境十年变化调查评估项目(2000—2010年)中山西省2010年土地利用类型数据中大于1 km²的居住地、工业

用地、采矿用地、交通用地等。

3.2.2 建立阻力面与缓冲区 不同的地理条件和社会经济作用对生态源地扩张和城镇用地扩张具有不同的影响。参考山西的生态环境现状,依据不同目标选择与生态源地和城镇用地扩张过程相关程度高的影响因子创建阻力面。将各个评价因子的原始数据进行标准化处理后对阻力进行赋值,依据各评价因子的影响程度大小采用层次分析法确定其权重(其评价因子及其权重详见表2,3),最后在 ArcGIS 中用栅格计算器工具将各评价因子进行加权求和计算,从而得到生态源地扩张过程和城镇用地扩张过程阻力面(附图10)。运用 ArcGIS 空间分析中的费用距离工具进行缓冲区分析,得到生态源地与城镇用地的累积阻力面(附图11)。

表 2 生态源地扩张阻力因子分级及权重

评价因子	权重	阻力值	阻力值	阻力值	阻力值	阻力值		
土地利用类型 (0.5997)	土地利用类型	0.5997	林地	0	湿地	5	建设用地	100
			草地	10	耕地	30	其他用地	70
距离因子 (0.0696)	距居民点的距离	0.009	<0.25 km	90	0.25~0.5 km	70	0.5~1 km	50
			1~2 km	30	>2 km	10		
	距河流的距离	0.0167	<0.5 km	10	0.5~1 km	30	1~2 km	50
			2~5 km	70	5 km 以上	90		
	距名胜古迹的距离	0.0184	<0.5 km	0	0.5~1 km	10	1~2 km	30
			2~5 km	50	5~10 km	70		
	距水库的距离	0.0104	<0.5 km	0	0.5~1 km	10	1~2 km	30
			2~5 km	50	5~10 km	70		
	距国道的距离	0.0055	<0.5 km	90	0.5~1 km	70	1~2 km	50
			2~5 km	30	5~10 km	10		
距省道的距离	0.0039	<0.25 km	90	0.25~0.5 km	70	0.5~1 km	50	
		1~2 km	30	2~5 km	10			5 km 以上
距高速公路的距离	0.0032	<1 km	90	1~2 km	70	2~5 km	50	
		5~10 km	30	10~15 km	10			15 km 以上
距铁路的距离	0.0024	<1 km	90	1~2 km	70	2~5 km	50	
		5~10 km	30	10~15 km	10			15 km 以上
地形因子 (0.0884)	高程	0.0663	<0.8 km	100	0.8~1 km	70	1~1.5 km	50
			1.5~2 km	30	2 km 以上	10		
	坡度	0.0221	<5	100	5~8	70	8~15	50
生态因子 (0.2423)	NDVI	0.0474	0~0.2	100	0.2~0.4	70	0.4~0.6	50
			0.6~0.7	30	0.7 以上	10		
	水源涵养量	0.1195	极重要	10	高度重要	30	中等重要	50
			较重要	70	一般重要	100		
土壤保持量	0.0753	极重要	10	高度重要	30	中等重要	50	
		较重要	70	一般重要	100			

3.2.3 生态安全格局空间识别结果 基于最小累积阻力模型对研究区生态安全格局进行空间识别。依据分位法进行分级,得到高中低3种水平生态安全格局缓冲区(表3),缓冲区分布在各生态源地的外围,大部分地区是低山区林地和灌草地。其中高、中、低水平格局面

积分别是39 133.65,38 606.11,40 229.03 km²,占全省国土面积的24.45%,25.66%和30.24%。高安全水平格局,生态环境质量好,基本未被破坏,生态系统结构合理、稳定,生态系统自身功能基本完善,自我恢复能力强,应作为禁止和限制开发区加强生态保护和生态修

复,禁止各种形式的开发建设活动;中等安全水平格局,生态环境有轻微程度破坏,生态结构较为完整,生态系统服务尚完好,受外界干扰后一般可自行恢复,生态破坏较少,应作为限制开发区加强生态保护和生态修复,禁止大规模的工业化、城镇化和资源矿产开发活动;最低标准安全水平格局与其他区域,由于城市扩张,生态环境出现退化,生态系统结构有所变化,生态系统功能尚可维持,受外界干扰能力弱,应维持生态保护与城市发展的平衡。

生态廊道作为生态源地间的低累积阻力区,是相邻两个源地最容易联系的低阻力生态通道。本文参考蔡青等^[23]所提出的基于不确定理论的生态廊道识别方法确定生态廊道空间分布。参照相关文献,生态廊道的宽度一般为600~800 m,本文设定生态廊道宽度为800 m,得到研究区生态保护区之间的生态廊道面积为9 790.26 km²,研究发现,由于山西省南北长东西短的形状特征,东部和西部的生态屏障需要与周边省市联合识别,在省市之间留出一定的生态保育带,确保区域生态安全。

表3 建设用地扩张阻力因子分级及权重

评价因子	权重	阻力值	阻力值	阻力值	阻力值			
土地利用类型 (0.5997)	土地利用类型	0.5997	林地	70	湿地	100	建设用地	0
			草地	30	耕地	10	其他用地	5
距离因子 (0.0696)	距居民点的距离	0.009	<0.25 km	10	0.25~0.5 km	30	0.5~1 km	50
			1~2 km	70	>2 km	90		
	距河流的距离	0.0167	<0.5 km	90	0.5~1 km	70	1~2 km	50
			2~5 km	30	>5 km	10		
	距名胜古迹的距离	0.0184	<0.5 km	90	0.5~1 km	70	1~2 km	50
			2~5 km	30	5~10 km	10		
	距水库的距离	0.0104	<0.5 km	90	0.5~1 km	70	1~2 km	50
			2~5 km	30	5~10 km	10		
	距国道的距离	0.0055	<0.5 km	0	0.5~1 km	10	1~2 km	30
			2~5 km	50	5~10 km	70		
	距省道的距离	0.0039	<0.25 km	0	0.25~0.5 km	10	0.5~1 km	30
			1~2 km	50	2~5 km	70		
距高速公路的距离	0.0032	<1 km	0	1~2 km	10	2~5 km	30	
		5~10 km	50	10~15 km	70			>15 km
距铁路的距离	0.0024	<1 km	0	1~2 km	10	2~5 km	30	
		5~10 km	50	10~15 km	70			>15 km
地形因子 (0.0884)	高程	0.0663	<0.8 km	10	0.8~1 km	30	1~1.5 km	50
			1.5~2 km	70	>2 km	100		
	坡度	0.0221	<5	0	5~8	30	8~15	50
			15~25	70	>25	100		
生态因子 (0.2423)	NDVI	0.0474	0~0.2	10	0.2~0.4	30	0.4~0.6	50
			0.6~0.7	70	>0.7	100		
	水土流失敏感性	0.1195	极敏感	10	高度敏感	30	中等敏感	50
			较敏感	70	一般敏感	100		
土地沙化敏感性	0.0753	极敏感	10	高度敏感	30	中等敏感	50	
		较敏感	70	一般敏感	100			

辐射通道是源地生态流向外扩散的低阻力谷线,是除生态廊道以外的低阻力路线,也是物种运动的潜在路线,能够为生态廊道提供补充。本文综合使用坡向变率和水文分析方法提取最小累积阻力面的谷线区域,将其作为辐射通道区域,本文设定辐射通道宽度与生态廊道相同为800 m,得到研究区生态保护区之间的辐射通道面积为12 143.67 km²。

战略点包括生物迁徙的踏脚石、生物廊道交汇处、生物廊道与城市道路的交叉点,在这些关键性节点上进行生态恢复,设立动物通道。生态战略节点是

源地间相互联系具有重要意义的节点,对维持区域生态功能可持续发展具有关键意义,本文所提取的生态战略节点主要是生态廊道之间的交点以及生态廊道与道路以及最大累积阻力路径的交点。

表3 山西省生态安全格局分布面积与比例

项目	高安全	中等安全	最低标准安全	其他	合计
	水平生态	水平生态	水平生态	区域	
面积/km ²	38320.29	40204.60	47382.96	30792.15	156700
比例/%	24.45	25.66	30.24	19.65	100

4 结论

(1) 划定生态保护红线对维护生态安全格局、保障生态系统功能、支撑经济社会可持续发展具有重要作用,是生态文明建设的基础性工作之一。山西省生态保护红线区域总面积为 4.20 万 km², 占全省国土面积的 26.79%, 其中太行山生态保护红线区面积 2.09 万 km², 占全省国土面积的 13.33%; 吕梁山生态保护红线区面积 1.64 万 km², 占全省国土面积的 10.47%; 恒山以北生态保护红线区面积 0.47 万 km², 占全省国土面积的 2.99%。我省生态保护红线区包括生态系统服务功能极重要区和已有各类生态保护区。

(2) 以山西省整个省域范围为研究对象, 识别了区域景观生态安全格局。分别提取了生态安全格局的 5 个组成部分: 生态源地、缓冲区、生态廊道、辐射通道、节点, 明确了研究区域生态保护的重点区域, 涵盖了重要生态功能保护格局、人居环境安全格局与生物多样性维护格局; 同时研究发现, 由于山西省南北长东西短的形状特征, 东部和西部的生态屏障需要与周边省市联合识别, 在省市之间留出一定的生态保育带, 确保区域生态安全。依据最小累积模型划分生态安全格局为高安全水平、中等安全水平、最低标准安全水平, 面积比例分别为 24.45%、25.66% 和 30.24%。

(3) 山西省生态保护红线是识别生态安全格局的重要组分, 生态保护红线划定中凸显了生态系统的完整性、生态系统服务功能的重要性, 可力保障我省森林和草地覆盖率稳步提高, 有效保护我省典型生态系统多样性和重点保护动植物, 空间识别和优化山西省“一带三屏”生态安全格局框架, 是维护山西省生态安全的底线; 生态保护红线严格划定是生态安全格局空间识别的基础, 生态保护红线中生态廊道和辐射通道的比例较小, 充分证明了今后山西省生态保护区之间建立生态廊道及其辅助通道的必要性。

参考文献:

[1] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展[J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 56-59.

[2] 笃宁, 陈文波, 郭福良, 等. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.

[3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.

[4] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 等. 区域生态安全格局: 设计原则与方法[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1055-1062.

[5] 刘洋, 蒙古军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.

[6] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 等. 区域生态安全格局: 设计原则与方法[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1055-1062.

[7] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5928-5936.

[8] 蒙古军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590-596.

[9] 欧定华, 夏建国, 张莉, 等. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 163-173.

[10] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.

[11] 高吉喜, 邹长新, 杨兆平, 等. 划定生态红线, 保障生态安全[N]. 中国环境报, 2012-10-18(2).

[12] 高吉喜. 探索我国生态保护红线划定与监管[J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 705-707.

[13] 饶胜, 张强. 划定生态红线创新生态系统管理[J]. 环境经济, 2012, 6: 57-60.

[14] Forman R T T. Land mosaics: The ecology of landscapes and regions[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

[15] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1): 1-17.

[16] 刘冬, 林乃峰, 邹长新, 等. 国外生态保护地体系对我国生态保护红线划定与管理的启示刘冬[J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 708-715.

[17] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局空间识别: 以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.

[18] 徐德林, 邹长新, 徐梦佳, 等. 基于生态保护红线的生态安全格局空间识别[J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 740-746.

[19] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.

[20] 罗鹏, 石军, 南孙华. 基于 GIS 空间模型的库区生态敏感性评价研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 255-258.

[21] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线: 基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.

[22] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.

[23] 蔡青, 曾光明, 石林, 等. 基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别[J]. 地理研究, 2012, 31(8): 1521-1534.